

特集「衝突現象・衝突地形」

小惑星25143イトカワのレゴリス厚さと 岩塊（ブロック）の数密度の推定

道上達広^{1, 2}

1. 目的

探査機「はやぶさ」は2005年夏に小惑星イトカワに到着する予定である。「はやぶさ」は世界で初めて小惑星の物質（サンプル）を直接採取し、地球に持ち帰ってくる探査である。サンプル採取は小惑星表面にタッチダウンした際に、弾丸を打ち込んで表面物質を粉碎し、飛び出した破片を回収することで行う。そのため表面がどのような状態であるかは重要な問題であるが、表面が一枚岩の岩盤で覆われているか、それとも大きな岩の塊が多く存在しているのか、あるいは細粒の層で覆われているのかよく分かっていない。もし小惑星表面に1m級の岩塊が多くあれば、はやぶさ探査機本体の大きさは1m程度であるため、タッチダウンする際にそれらに接触する危険性がある。本研究ではその危険性を調べるために、小惑星イトカワの表層状態について見積もることにした。

小惑星表面は多くのクレーターとクレーター形成によって放出される破片の堆積物によって特徴づけられる。多くのクレーターは繰り返し行われる衝突によって小惑星表面に形成される。クレーター形成で放出された破片の一部は、母天体の重力によって引きよせられ、再び表面に降り積もる。それらの堆積した層はレゴリス層と呼ばれる。小惑星表面の詳細な画像は、2000年に行われた探査機ニアにおける小惑星エロス（平均直径約16km）の観測によって得られている。それによると、小惑星エロスの表面はクレーター形成によってできた様々な大きさの破片（大きなもので数10m）、すなわちレゴリス層に覆われていることがわかっている。

一方、小惑星イトカワ（平均直径約360m）は平均直径にして小惑星エロスの約50分の1しかないので、レゴリス層が存在しているかどうかは疑わしい。なぜなら重力が極端に小さいため、クレーター形成によって放出された破片を捕らえることが難しいからである。

クレーター形成の際、放出される破片の速度はどうだろうか。玄武岩を用いた室内衝突実験の結果[1]によれば、1m/sよりも遅い破片は存在しないことになる。小惑星イトカワの脱出速度は1m/sにも満たない12.7-24.6cm/s [2]と極端に小さいため、イトカワが玄武岩のような強度の強い物質でできていれば脱出速度を超えてしまい、破片は降り積もらないことが予測される。しかしながら道上他（2000）[3]ではモデル計算によって、強度の弱い物質を想定すれば、クレーター形成によって放出される破片の平均速度は遅く、数kmの小さな小惑星でも破片は降り積もることができることを示した。このモデル計算ではGault[1]とHousen（1992）[4]の実験結果を基に、物質強度とレゴリス厚さの関係を見積もった。その後、Michikami et al.（2001）[5]ではクレーター衝突実験を行い、物質強度が弱いほど破片の平均速度が遅いことをさらに定量的に示した。また物質強度が強いものでも、少量ではあるが1m/s以下の遅い破片を持ったものがあることを明らかにした。

本研究では、道上他[3]のモデル計算を基に新たにMichikami[5]の室内実験の結果を加えることで、平均直径360mという小さな小惑星イトカワのレゴリス層の厚さを見積もった。また、このように小さい小惑星ではレゴリス層が存在したとしても極端に薄いことが

1. 福島工業高等専門学校

2. 宇宙科学研究本部 共同研究員

予測されるため、比較的速度の遅い大きな破片が選択的に存在している可能性がある。そこで1m以上のブロックの数密度についても見積もることにした。

2. イトカワの形状

レゴリス進化モデルについて述べる前に、小惑星イトカワの形状について見てみよう。Ostroet al. [2]はレーダー観測を行い、Hudson (1993)[6]のモデルを使ってS型小惑星イトカワの形状を見積もった。彼らの研究によると、小惑星イトカワの三主軸の大きさは $548 \times 312 \times 276\text{m}$ ($\pm 10\%$)である。形状モデルについては不確定性な要素があるものの、他の研究者によっても極端に大きな違いは見られないことから、今回は彼らの結果[2]を用いることにする。彼らはレーダーの反射と偏光特性から、小惑星表面の密度を 2500kg/m^3 ($\pm 10\%$)と見積もっている。この値はS型小惑星によく見られる密度である。また、小惑星イトカワの脱出速度は前にも述べたように $12.7\text{--}24.6\text{cm/s}$ であり、今回は簡単のため、脱出速度を平均値の 19cm/s で与える。小惑星表面積は上の3主軸の大きさから楕円体を仮定して約 $5.0 \times 10^8\text{m}^2$ とした。

3. イトカワのレゴリス厚さ

3.1 レゴリス進化モデル

小惑星の初期状態として、裸の状態、つまりレゴリス層のない状態を仮定する。この表面上に天体が衝突すると、クレーター形成によって岩盤が掘り起こされ表面上に破片が降り積もる。衝突が繰り返されるにつれレゴリス層はだんだん厚くなる。レゴリス層がある程度の厚さに達すると、小天体の衝突はレゴリス層の中で起きるようになり侵食が始まる。このような複雑なレゴリス層の進化を解析的に表すことは難しい。それゆえ数値計算はレゴリス進化を表す方法として適していると考えられる。この研究ではモンテカルロ計算を行った。

小惑星表面積に対応する2次元グリッドを考える。多くのクレーターはグリッド上に作られる。クレーターを作る時期、場所はモンテカルロ法で与えられる。すなわち、クレーターは予想された連続的なサイズ分布からランダムに選択され、ランダムな時間に表面にランダムに形成される。破片は衝突クレーター形成によって作られ放出される。脱出速度を超えなかった破片は再び降り積もり、表面上に様に集積すると仮定する。集積した破片はレゴリスとして考える。レゴリスの厚さの平均値を求める際、破片の大きさはここでは考えないことにする。クレーター形成とそれによる破片の堆積によって、表面の高さとレゴリス厚さは変わる。そのように各点におけるレゴリス厚さは各グリッドに記録される。

小惑星イトカワのレゴリス厚さの見積もりは、(1)クレーターサイズ分布、(2)クレーター形成において放出された破片が表面に再集積する割合の2つによって大きく支配される。そこでそれらを次のように与えた。

(1) クレーターサイズ分布

月や小惑星で観測されるクレーターのサイズ分布は累積べき乗分布で表わされることが多い。そこで小惑星イトカワにおけるクレーターサイズ分布を次のように与えた。

$$N(>D) = CD^{-b}$$

ここで $D[\text{m}]$ はクレーターの直径、 $N(>D)$ は $D[\text{m}]$ よりも大きいクレーターの数で、 C 、 b は個々の小惑星によって決まる定数である。 b の値は観測では2から2.5の範囲であることが多いが、今のところよく分かっていない。様々な大きさのクレーターを考えたとき、 $b=2$ を用いた方が観測結果に一致すると著者は考えた。そこで今回は $b=2$ を用いることにする。 $b=2.5$ を用いた場合は、全クレーター体積が $b=2$ を用いた場合と比べて2倍程度大きくなるため、計算の結果得られるレゴリスの厚さも2倍程度大きくなると予想される。

C は小惑星イトカワの最大クレーターの大きさを仮

定して決めることができる．今まで観測された小惑星や衛星に見られる最大クレーターの大きさは、母天体の平均直径の40-60%になるものが多い．ガスプラのように30%以下（ガスプラは平均直径の約24%）や70%以上のクレーターは稀である．小惑星エロスおよび小惑星マチルダにおける最大クレーターは母天体の平均直径の60%を占める．そこでイトカワの場合も同じく最大クレーターが母天体の平均直径の60%(40%から60%の上限値をとった)を占めていると仮定して、

$$\begin{aligned} & \text{イトカワの最大クレーター直径} (\sim 220\text{m}) \\ & = \text{イトカワの平均直径} (\sim 360\text{m}) \times 60\% \end{aligned}$$

とした．よって220m以上のクレーターは1つしかないことから、 $C=220^2$ と決めることができる．ちなみに最大クレーターの大きさを60%とした場合と比べて、最大クレーターの大きさを40%（イダは平均直径の約44%）とした場合は全クレーター体積が半分弱になり、最大クレーターの大きさを80%（ベスタは平均直径の80-90%）とした場合は全クレーター体積が2倍強になるため、計算の結果得られるレゴリスの厚さは、それぞれ半分弱、2倍強になると予想される．

(2) 破片が表面に再集積する割合

クレーター形成によって放出された破片が表面に再集積する割合は、小惑星の脱出速度と破片の速度分布に依存している．クレーター形成における破片の速度分布は室内衝突実験の結果から求める．図1は破片の速度分布で、横軸に破片の速度、縦軸にその速度よりも速い破片の質量を全質量で規格化して、両対数グラフで示してある．この図ではデータ点が右上に行くほど破片の平均速度が大きくなっていることを示している．この図から物質強度が小さくなるにつれて、破片の平均的な速度が遅くなっていることがわかる．この実験室スケールの結果を小惑星スケールに応用するために、図1の横軸を Housen et al. (1983) [7] の次元解析から得られた無次元量 $v\sqrt{\rho/Yt}$ (v [m/s]は放出速

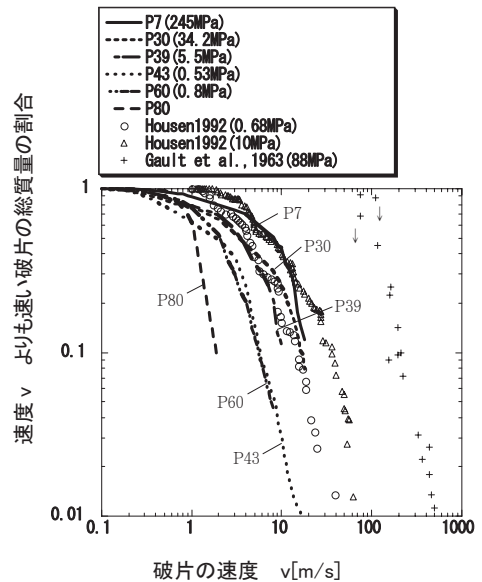


図1：破片の速度分布．標的として点線、実線がガラスビーズ焼結体[5]、白丸、白三角が玄武岩、鉄、接着剤、水の混合物[4]、十字が玄武岩[1]を用いた衝突実験データである．括弧はその標的の圧縮強度を示す．[5]について、ほぼ同じ実験条件で P7は3回、P30は2回、P39は3回、P43は3回、P60は2回、P80は1回、実験を行っている．それらの平均値を図に示した．

度、 $[\text{kg/m}^3]$ はターゲット密度、 Y_t [Pa]はターゲットの引張強度)で規格化した (図2 a)．Michikami [5]の実験データは Gault [1]、Housen [4]の実験データよりも同じ密度、同じ強度において、速度が遅いことを示している．今回これらのデータ点を速度の速い破片、遅い破片の2つの領域に分けて、2つの関数形 (図2 aの実線) でフィッティングさせた． $v\sqrt{\rho/Yt}$ が0.7よりも小さいときは

$$\begin{aligned} f\left(> v\sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right) &= 1 - 1.54\left(v\sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right) \\ &+ 0.43\left(v\sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right)^2 + 0.36\left(v\sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right)^3 \end{aligned}$$

が得られる．この式の係数は両対数グラフにおいて最小2乗法で得られる．一方、0.7よりも大きい無次元パラメーターの場合は、

$$f\left(> v\sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right) = 0.142\left(v\sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right)^{-1.65},$$

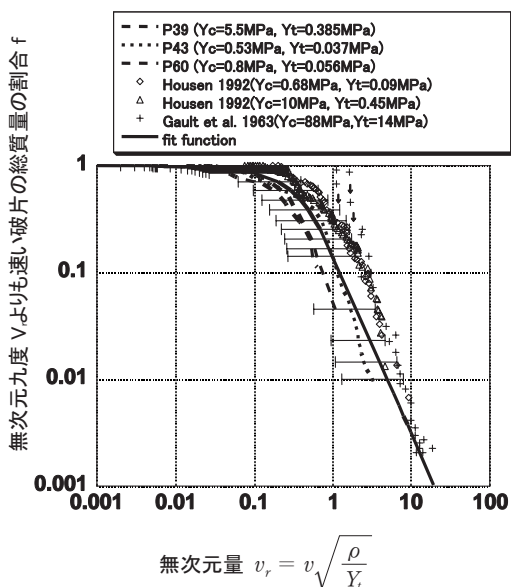


図2a：規格化した破片の速度分布。Ycは圧縮強度、Ytは引張強度である。典型的な岩石ではYtは、Ycの8分の1から20分の1程度である。今回はその中間値をとって、Yt=Yc/14と仮定した。[5]のデータについては、P39、P43、P60のデータのみ規格化した。P7、P30は実験において速い破片の速度（20m/s以上）を測定できなかったため、またP80はあまりにも脆く強度測定不可能であったため、規格化しなかった。

で得られる。ここで、べきの指数1.65はHousen[4]が示した値を用いた。結局、破片の再集積割合 F_s は

$$F_s(Y_t) = 1 - f\left(> v \sqrt{\frac{\rho}{Y_t}}\right)$$

によって計算される。ここで、vは小惑星の脱出速度、 ρ は小惑星の密度、 Y_t は小惑星の引張強度となる。例えば、イトカワの場合の脱出速度 $v=0.19\text{m/s}$ 、密度 $\rho=2500\text{kg/m}^3$ 、引張強度 $Y_t=10\text{MPa}$ （この値の妥当性は後で述べる）とすると、 $v\sqrt{\rho/Y_t} = 0.003$ となり $f(v\sqrt{\rho/Y_t})=0.995$ で再集積する割合は0.5% ($F_s = 1 - f = 0.005$) となる。

F_s の値（またはfの値）について補足しておく。図2bは低速度の破片の総質量をみるために、図2aの横軸1以下、縦軸0.9以上のデータを拡大してプロットし直したものである。ここで黒の点は破片の速度が0-0.40m/s（平均0.20m/s）の実験データのみをプロットしたものである。P7のようにMichikami[5]の実験

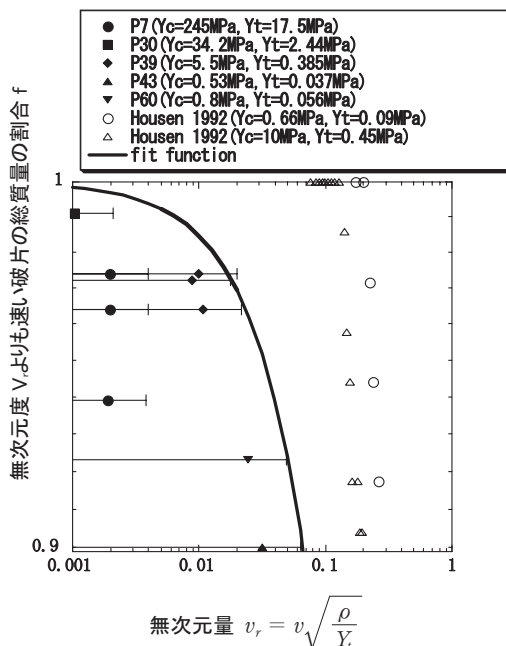


図2b：規格化した破片の速度分布で、図2aの横軸1以下、縦軸0.9以上のデータを拡大してプロットし直したもの。ここで黒の点は破片の速度が0-0.40m/s（平均0.20m/s）実験データのみを抽出してプロットしており、平均値でなくショットごとに示してある。この図では遅い速度を持った破片のみを扱っているので、P7、P30の実験データも規格化しプロットした。

では、圧縮強度245MPa（引張強度17.5MPa）の強度の強い標的でも、0-0.40m/sの遅い速度を持った破片は全破片の総質量の2-6%を占める（図2b、図1）。一方、Gault[1]やHousen[7]の実験では1m/sよりも遅い破片は存在しない（図1）。今回用いた図2の実線のフィット関数は、[5]と[1][7]の実験データの間接値をとるものであり、0.19m/sよりも遅い速度を持った破片は、全質量の0.5%を占めることになる。

多くの衝突の後、表面は徐々にレゴリス層に覆われる。レゴリス層で起こる衝突に関しては、砂の実験で得られているスケージング則[7]を用いる。砂において破片の速度分布は次のように与えられる。

$$f\left(> \frac{v}{\sqrt{gR}}\right) = \frac{V_e}{V_{total}} = 0.32 \left(\frac{v}{\sqrt{gR}}\right)^{-1.22}$$

ここで V_e は脱出速度よりも速い速度を持った破片の総体積 [m^3], V_{total} は放出された破片の総体積 [m^3], g は重力加速度 [m/s^2], R はクレーターの半径 [m] である. このようにレゴリス層の中では, 破片の再集積の割合 F_g は以下の式によって計算される.

$$F_g(R) = 1 - f\left(> \frac{v}{\sqrt{gR}}\right)$$

ここで, v は小惑星の脱出速度になり, 降り積もる割合は R の関数となる. 以上の式を基にモデル計算を行った.

3.2 結果 (1)レゴリス厚さ

イトカワのレゴリス平均厚さを物質強度の関数として図3に示した. 小惑星イトカワのように小さな小惑星では, 物質強度によってレゴリスの厚さが大きく異なり, 物質強度が弱くなるにつれてレゴリス厚さが大きくなるのがわかる. ここで小惑星の物質強度について考えてみる. 隕石のほとんどは小惑星から来る. それらの圧縮強度は400MPa から6MPa である[8]. また一部の小惑星はすでに活動を終えた彗星のなれの果てともいえる. Greenberg et al. (1995)[9]によれば, SL9彗星の引張強度は小さい(100-1000Pa). このように考えられる小惑星物質の引張強度は 10^{-3} - 10^2 MPa と範囲が広い. イトカワは小惑星帯から現在の軌道に落ちて来たと考えられるが, 移動のときに壊れずに近地球型小惑星になるためには, 10MPa 程度の強度が必要であると言われている[10] (この値は, 小惑星のサイズ, 形, 表面温度変化のタイムスケール等によって決まる). また後で述べるように (考察の章を参照), イトカワと同じS型小惑星のエロス, ガスプラの引張強度を10MPa と仮定すると, 観測されているそれらのレゴリス厚さを今回のモデルで再現することができる. そこでS型小惑星の引張強度は同じであると仮定し, イトカワの引張強度を10MPa とすると, レゴリスの厚さは数 cm とかなり薄いことがわかる (レゴリスの厚さが薄いため, 解析解でもこの値に非常に近い値を求めることはできる). ここで注意しなければ

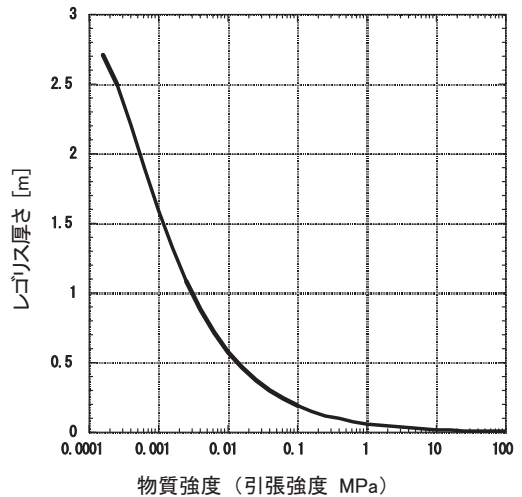


図3 : 小惑星イトカワのレゴリス厚さと物質強度
横軸に小惑星の物質強度として引張強度を, 縦軸にレゴリス厚さの平均の値をとってある. 引張強度1MPa で5.7cm, 10MPa で1.8cmのレゴリスの厚さになる.

ばならないのは, この値はあくまでもクレーター形成によって降り積もった破片の大きさを考えずに一様 (砕いて) 表面にならした値である. イトカワの表面状態を示すには現実的ではないかもしれない. そこで, 破片の大きさについても考えてみることにする.

4. ブロックの数密度

4.1 室内実験における破片のサイズ分布

降り積もる破片のサイズ分布を見積もることは難しい. クレーター形成において同じ実験条件下でも, ターゲットの表面状態のわずかな違いによって, スポール破片と呼ばれる大きな破片が放出されたりしなかったりする. そのため破片のサイズ分布 (特に大きな破片) にばらつきが見られる. また, 破片の大きさと速度の関係について室内実験でも十分なデータが得られていない. 前に示した図1はクレーター形成における破片の速度分布を示したものであったが, 破片の大きさは考えず破片の総量を扱ったものであった. クレーター形成ではなく, ターゲットそのものが破壊される衝突破壊実験では, 破片の速度 v と質量 m の間に $v(m)$

$m^{-1/6}$ の弱い相関関係が知られているが[11], 同じ速度の破片でも質量にかなりのばらつきがある. 衝突破壊における破片の累積サイズ分布は, $N(>m) \propto m^{-2/3}$ で表せることが多い. 小惑星帯における小惑星のサイズ分布も同じべき乗分布で示される.

クレーター形成における破片の大きさと速度の関係を定量的に扱った実験はないが, 定性的には森口[12]の実験で次のような面白い結果が得られている. 図4は, 彼の実験によって得られたクレーター形成における破片のサイズ分布で, 速度ごとの破片サイズ分布を示している (実験条件は[5]と同じ). 横軸に破片の質量, 縦軸にその質量よりも大きい破片の数をとっている. 実験では1m/sよりも速い破片も多く観測したが, 質量が小さいためここでは速度の遅い破片だけについて示し, 3つの速度範囲に分類した. 図4でわかることは, 破片の数は速度が速くなるにつれて減少するものの, いずれの速度においても分布の傾きはほぼ同じになっている. これは速度によらず破片のサイズ分布が $N(>m) \propto m^{-2/3}$ の同じ形で表せることを示唆している. 衝突破壊実験における破片全体のサイズ分布と同じ形であることも興味深い. この結果を定量的に扱うには, 更なる実験データが必要であるが今回はこの結果を用いることにした. つまり, 速度に関係なく破片のサイズ分布は $N(>m) \propto m^{-2/3}$ で表せると仮定し計算を行うことにした. イトカワの脱出速度は0.19m/sであるから, イトカワに降り積もると考えられる破片サイズ分布は図4の白丸のデータに相当するだろう.

4.2 最大ブロックの見積もり

直径 D [m]のクレーターが形成されたとき, イトカワに降り積もる最大ブロックの質量を $M(D)$ [kg]とする. イトカワに降り積もる破片の累積サイズ分布を $N(>m) \propto m^{-2/3}$ で与えると, 破片の微分サイズ分布は $n(=m) dm \propto m^{-5/3} dm$ で与えることができる. ここで m は質量[kg], n , N はそれぞれ破片の個数および累積個数である. この式

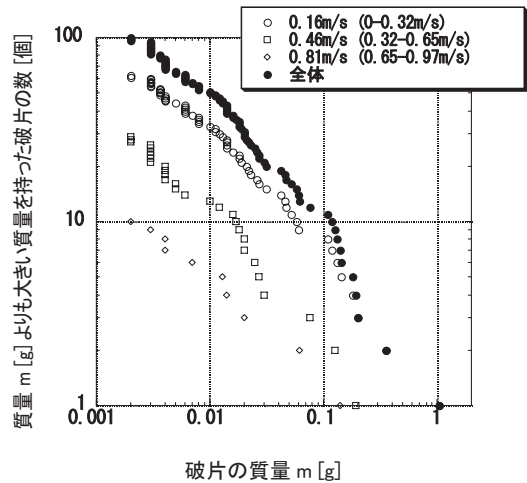


図4：破片のサイズ分布
横軸に破片の質量, 縦軸にその質量よりも大きい質量を持った破片の数を速度別に両対数グラフでとっている. 破片の速度は白丸が0-0.32m/s, 四角が0.32-0.65m/s, 菱形が0.65-0.97m/sで, それら3つのサイズ分布の合計が黒丸で表してある. 標的はガラスビーズを焼結させたもので, 空隙率43%, 密度1421kg/m³, 圧縮強度0.53MPaである.

で比例定数は $N(>M(D))=1$, つまり最大ブロックの質量 $M(D)$ を決めれば一意に求まる. 直径 D [m]のクレーターが形成されたとき, イトカワに降り積もる破片の総質量 $M_{block}(D)$ [kg]は

$$M_{block}(D) = \int_{m=0}^{m=M(D)} n(=m) dm$$

で表せる. ここで最大ブロックの質量 $M(D)$ はクレーターの大きさによって次のように与える. 直径 D [m]のクレーターに対して, 放出された破片の総質量を $M_{total}(D)$ [kg]として, $M_{block}(D)$ が

$$M_{block}(D) = F_s(Y_t) M_{total}(D)$$

となるように $M(D)$ を決める. ここで $F_s(Y_t)$ は降り積もる割合で常に一定の値をと仮定した. $Y_t=10$ MPaと仮定すると $F_s(Y_t) = 0.005$ となる. 例えば, 220mのクレーターでは最大ブロックの大きさは17mになる (小惑星密度は場所によらず一様とした). 月や小惑星エロスにおいて, クレーター (直径 D [m])と最大ブロック (直径 L [m])の関係には $L \sim 0.25 D^{0.7}$ という経験則があり[13], 17mという大きさはこの経験則

と矛盾しない。以上の式を用いて、各クレーターの大きさごとに最大ブロックを見積もり、ブロックの数密度を計算した。

4.3 結果(2) - ブロックの数密度

図5は小惑星イトカワにおいて予想されるブロックのサイズ分布で、1m以上のブロックは約400個になる。1m以上の破片の全表面積 $S(>1)[m^2]$ は、破片が球であると仮定し、

$$S(>1) = \int_{D=1}^{D=17} n(=s)\pi\left(\frac{s}{2}\right)^2 ds$$

で表すことができる。ここで $s[m]$ はブロックの直径、 $n(=s)$ はそのブロックの個数で、これが天体全表面積に占める割合は、イトカワの表面積 $5.0 \times 10^5 m^2$ で割ると0.4%となる。このように1m以上のブロックが天体表面に占める割合は、物質強度を10MPaとして1%以下(0.4%)となり、探査機がブロックに接触する危険性はあまりないと考えられる。

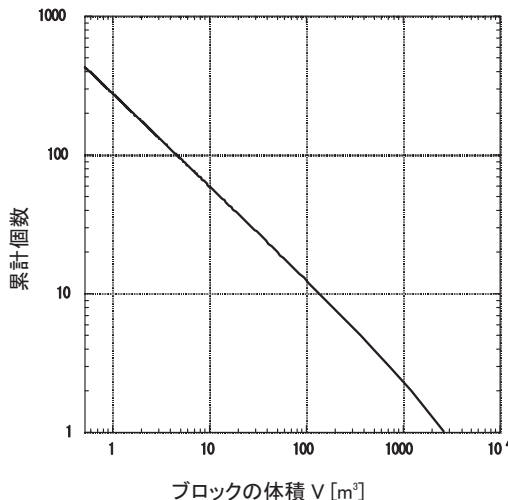


図5：イトカワにおいて予想されるブロックのサイズ分布

5. 考察

初めにレゴリス厚さに影響するであろう曲面の影響とレゴリスの移動について述べる。次にS型小惑星

であるガスプラ、エロスにおいて、画像データから見積もられているレゴリスの厚さについて言及する。最後に小惑星エロスに見られるブロックの数密度について言及し、イトカワのブロックの数密度との違いについて述べる。

5.1 曲面の影響、レゴリスの移動

大きなクレーターはレゴリス形成に大きく影響するので、小惑星の曲面を無視することはできない。シミュレーションは2次元グリッド上で行ったので、曲面にできるクレーターと平面にできるクレーターの違いについて考える必要がある。Fujiwara(1993)[14]は、同じ大きさの弾丸を玄武岩の標的に衝突させてクレーターの形、大きさを調べた。それによると、完全な球では平面にできるクレーターと比べて深さは浅くなり、クレーター直径は増加する。全体としてクレーター体積は平面にできるそれと変わらない。一方、楕円形の場合は、クレーターができる場所によって形は異なり、クレーター体積も平面のそれと2倍程度異なっている。イトカワは楕円体なので、レゴリスの厚さは2倍ほど異なるかもしれない。曲面にできる大きなクレーターについてさらなる研究が必要である。

小惑星エロスには、レゴリスが小惑星表面を移動したあとにできたポンドと呼ばれる地域がある。火星の衛星フォボスでもレゴリスの移動が示唆されていたが、小惑星エロスではじめて明らかになった。レゴリスが移動するメカニズムはよくわかっていないが、重力的に低い場所にポンドが形成されている。レゴリス厚さの表面分布は地形の起伏によって大きく影響される。

5.2 ガスプラ、エロスのレゴリス厚さ

探査機のデータから、Carr et al. (1994)[15]はガスプラのレゴリス厚さを数10mと見積もった。彼らはガスプラの表面をファセットと呼ばれる平らな面と、その角にありファセットの境界を作るリッジに分割して考えた。もっとも特徴的な表面の色の違いがリッジにおけるクレーターまわりに観測された。1 μmの吸

収が見られたのである。この色の違いはファセットにおけるクレーターのまわりには観測されなかった。彼らはこの色の違いを次のように考えた。リッジは重力的に高い位置にあり、レゴリスがファセットに移動してしまうため、レゴリス厚さはファセットに比べて小さい。そのため、リッジにクレーターが形成された際、レゴリス層の下の岩盤が掘り起こされ、新鮮な破片がクレーターのまわりに堆積する。それが色の違いとなって現れる。彼らはファセットには少なくとも50mのレゴリス層が存在していると考えた。

一方、エロスのレゴリス厚さは2mから150mと考えられている[16]。エロスには、直径100mよりも小さいクレーターが欠乏しており、レゴリスの移動によってそれらが埋まっている可能性がある。Izenberg et al. (2001)[17]は衝突による振動を考え、直径100m程度のクレーターはレゴリスによって埋まっていることを示した。クレーターの深さは直径の5分の1程度であるから、直径100m程度のクレーターが埋まっていることを考慮すると、エロスのレゴリスの平均厚さは20m程度であると考えられる。

観測結果と今回のモデル計算を比較するために、ガスプラ、エロスのレゴリス厚さを今回のモデル計算と同じ方法で見積もった[18]。この計算では、観測されたクレーター分布を使ってある。探査機の撮像限界により、観測されなかった小さなクレーターについては無視した。そのため、レゴリス厚さの見積もりは少し小さいかもしれないが、レゴリス形成は大きなクレーターによって決まるので、ほとんど影響がないと考えられる。モデル計算の結果、物質強度（引張強度）を10MPaとすると、ガスプラで30m、エロスで50mと観測から見積もられている値とほぼ一致していることがわかった。イトカワもガスプラ、エロスと同じくS型小惑星であるため、物質強度10MPaは妥当な仮定と考えられる。

5.3 ブロックの数密度-小惑星エロスとの比較

今回求めたイトカワのブロックの数密度は、天体表

面に放出されてから壊れることを考えていない。探査機本体のブロックへの危険性の調査を目的としたため、数密度の上限値の値を求めたことになる。イトカワで推定される実際の数密度はこの値よりもかなり小さいことも考えられる。

ここで、詳細な画像データが得られている小惑星エロスのブロックの数密度についてみてみよう。Thomas et al.[13]は画像データから小惑星エロスにおける直径15m以上のブロックを調査、それらをモデル計算によってシミュレートした。その結果、小惑星エロスに見られるブロックのほとんどは直径7.6kmのShoemakerクレーターから放出されたことを提案している。それより前にできたクレーターから放出されたブロックは埋まったり、壊れたりしていると考えた。彼らの計算によると、Shoemakerクレーターによって放出された破片の総体積 V_s は $1.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ で、15m以上のブロックの総体積 V_b は $6 \times 10^7 \text{ m}^3$ である。放出された破片の総体積の0.4% ($=V_b/V_s$) がブロックとして小惑星表面に堆積したことになる。小惑星エロスにおいて破片が再集積する割合は今回の計算から10-20%と考えられるので、再集積した総体積を $V_c (=V_s \times 10-20\%)$ とすると、堆積した破片の総体積 V_c に対して15m以上のブロックの総体積 V_b が占める割合は単純に $2-4\% (=V_b/V_c)$ と小さいように見える。しかしながらエロスの場合、クレーターから放出されたブロックの一部は、平均20mのレゴリス層の中に埋もれている可能性が大きいので、ブロックの総体積はこれらの値よりも大きいことが予想される。

一般に生成されたブロックは（1）ブロックがレゴリス層に埋もれている割合が大きいほど、（2）クレーターのできた時期が古いほど、数が減ることが予想される。（1）についてイトカワの場合、今回の計算でレゴリス層は平均数cmと薄いため、ブロックがエロスのようにレゴリス層の中に埋もれている可能性は低いと考えられる。（2）については詳細な画像データを取得しないと予測することは難しい。結局のところ、

ブロックの数密度の上限値以外の値を見積もることは難しく、今後さらなる研究が必要であろう。

参考文献

- [1] Gault, D.E. et al., 1963, NASA Tech. Note, D-1767
- [2] Ostro.S.J. et al., 2004, Meteoritics and Planetary Science, 39, 407
- [3] 道上達広ほか, 2000, 遊星人, 9, 186
- [4] Housen, K.R., 1992, LPSC XIII, 555-556
- [5] Michikami, T et al., 2001, Proc.of 34th Lunar and Planetary Symposium, 107-110
- [6] Hudson, S., 1993, Remote Sensing Reviews 8:195-203
- [7] Housen,K.R. et al., 1983, J.Geophys.Res., 88, 2485-2499
- [8] Wasson, J.T., 1974, Classification and Properties. New York, Springer-Verlag, 316
- [9] Greenberg, I.M., 1995, Astronomy and Astrophysics, 295, 35-38
- [10] Dombard, A.J. and Freed, A.M. 2001, American Geophysical Union, Spring Meeting, 22
- [11] Nakamura, A. and Fujiwara, A. 1991, Icarus 92, 132-146
- [12] 森口功一. 2000, 修士論文 (東京大学)
- [13] Thomas, P.C. et al., 2001, Nature, 413, 394
- [14] Fujiwara,A. et al., 1993, Icarus 105. 345-350
- [15] Carr, M.H. et al., 1994. Icarus 107. 61-71
- [16] Barnouin-Jha, O.S. et al., 2001, American Geophysical Union, Fall Meeting B-0555
- [17] Izenberg, N.R. et al., 2001, 32th LPSC. No2083
- [18] Michikami. T 2001, Ph.D.thesis, Univ. of Tokyo